Iranian Food Science and Technology Research Journal
Homepage: https://ifstrj.um.ac.ir

Research Article
Vol. 20, No. 2, May-June 2024, p. 339-350

Effect of Microwave Treatment on Physicochemical Characteristics and Efficiency of Sour Cherry Drying Process

F. Salehi[1*], M. Inanloodoghouz[2], S. Ghazvineh[3], P. Moradkhani[3]

1, 2 and 3- Associate Professor, M.Sc. Student and B.Sc. Student, Department of Food Science and Technology, Faculty of Food Industry, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author's Email: F.Salehi@Basu.ac.ir)

Received: 24.07.2023
Revised: 17.08.2023
Accepted: 13.09.2023
Available Online: 13.09.2023

How to cite this article:
Salehi, F., Inanloodoghouz, M., Ghazvineh, S., & Moradkhani, P. (2024). Effect of microwave treatment on physicochemical characteristics and efficiency of sour cherry drying process. *Iranian Food Science and Technology Research Journal, 20*(2), 239-350. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/ifstrj.2023.83605.1272

Introduction

Sour cherries (*Prunus cerasus* L.) are relatively diverse and broadly distributed around the world, being found in Asia, Europe, and North America. Sour cherries have unique anthocyanin content, and rich in phenolic compounds. The fruits are generally used for processing purposes, such as for production juice and jam. The fruits of sour cherries can also be frozen and dried. One of the best methods for the preservation of agricultural product is drying, which involves removing water from the manufactured goods. Dried sour cherries have a long shelf life and therefore may be a fine alternative to fresh fruit all year round. There are no reports on the effect of microwave pretreatment on the hot air drying kinetics of sour cherries in the literature. Hence, the purpose of this study was to estimate the impacts of microwave pretreatment on the total phenolics, drying time, mass transfer kinetic, effective moisture diffusivity, total color difference index, shrinkage and rehydration of sour cherry. In addition, the moisture ratio changes of sour cherry during drying were modeled.

Material and Methods

Sour cherries were purchased from the market at Bahar, Hamedan Province, Iran. The average diameter of fresh sour cherries was 1.6 cm. In this study, the water content of fresh and dried sour cherries was calculated using an oven at 103°C for 5 h (Shimaz, Iran). In this research, the effect of microwave time on the drying time, effective moisture diffusivity coefficient and rehydration of sour cherries was investigated and drying kinetics were modeled. To apply the microwave pretreatment on the sour cherries, a microwave oven (Gplus, Model; GMW-M425S.MIS00, Goldiran Industries Co., Iran) was used under atmospheric pressure. In this work, the influence of the microwave pretreatment time at five levels of 0, 30, 60, 90, and 120 s (power=220W) on the cherries was examined. After taking out the treated sour cherries from microwave device, the samples were placed in the hot-air dryer (70°C) as a thin layers. The dehydration kinetics of sour cherries were explained using 7 simplified drying equations. Fick's second law of diffusion using spherical coordinates was used to calculate the moisture diffusivity of sour cherries at various hot-air drying conditions. The rehydration test was conducted with a water bath (R.J42, Pars Azma Co., Iran). Dried sour cherries were weighed and immersed for 30 min in distilled water in a 250 ml glass beaker at 50°C.

Results and Discussion

The results showed that microwave treatment led to an increase in moisture removal rate from the sour cherries, an increase in the effective moisture diffusivity coefficient, and, consequently, a decrease in drying time. By increasing the microwave time from 0 to 12 s, the average drying time of sour cherries in the hot-air dryer was decreased from 370 min to 250 min ($p<0.05$). The average effective moisture diffusivity coefficient calculated for

©2023 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

https://doi.org/10.22067/ifstrj.2023.83605.1272

the samples placed in the hot-air dryer was 4.25×10^{-10} m^2/s. Increasing the microwave time from 0 to 120 s increased the average effective moisture diffusivity coefficient by 85%. The maximum amount of phenolic was related to the sample treated with microwave for 90 seconds. Microwave treatment time had no significant effect on the rehydration of dried sour cherries.

Conclusion

Kinetic modeling of weight changes of sour cherries during drying was carried out using models in the sources, followed the Page model was selected as the best model to predict moisture ratio changes under the selected experimental conditions. The mean values of sum of squares due to error, root mean square error, and r for all samples ranged from 0.001 to 0.007, 0.005 to 0.017, and 0.997 to 0.999, respectively. Generally, 120 s pre-treatment by microwave is the best condition for drying sour cherries.

Keywords: Drying, Effective moisture diffusivity coefficient, Shrinkage, Total phenolic

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
https://ifstrj.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۲۰، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۳، ص. ۳۵۰-۳۳۹

اثر تیماردهی با امواج مایکروویو بر خصوصیات فیزیکوشیمیایی و کارایی فرآیند خشک شدن آلبالو

فخرالدین صالحی[1]* - معین ایناللودوقوز[2] - سارا قزوینه[3] - پریسا مرادخانی[3]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۰۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۲۲

چکیده

آلبالو خشک‌شده ماندگاری زیادی دارد و می‌تواند جایگزین خوبی برای میوه تازه باشد. در این پژوهش اثر اعمال پیش‌تیمار مایکروویو بر محتوای فنل کل، زمان خشک‌شدن، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت، شاخص تغییرات رنگ کلی، چروکیدگی و آبگیری مجدد آلبالو بررسی و سینتیک خشک شدن آن مدل‌سازی شد. برای اعمال پیش‌تیمار مایکروویو، آلبالوها به‌مدت ۰، ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ ثانیه داخل دستگاه مایکروویو قرار گرفتند و بعد از خروج از دستگاه، به‌صورت لایه‌نازک داخل خشک‌کن با دمای ۷۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند. نتایج این پژوهش نشان داد که تیمار مایکروویو، به‌صورت معنی‌داری سبب افزایش سرعت خروج رطوبت از آلبالوها، افزایش ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و در نتیجه باعث کاهش زمان خشک‌کردن آلبالوها شد (p<۰/۰۵). با افزایش زمان تیمار مایکروویو از صفر به ۱۲۰ ثانیه، میانگین زمان خشک شدن آلبالوها در خشک‌کن ۳۲ درصد کاهش یافت. همچنین با افزایش زمان تیمار مایکروویو از صفر به ۱۲۰ ثانیه، متوسط ضریب نفوذ مؤثر رطوبت ۸۵ درصد افزایش یافت (p<۰/۰۵). حداکثر مقدار فنل مربوط به نمونه تیمار شده با مایکروویو به‌مدت ۹۰ ثانیه بود. با افزایش اعمال تیمار مایکروویو، شاخص تغییرات رنگ نمونه‌ها افزایش یافت، البته این تغییر معنی‌دار نبود (p>۰/۰۵). با اعمال بیش از ۶۰ ثانیه مایکروویو، به علت افزایش سرعت خروج رطوبت از نمونه و کاهش زمان خشک شدن، چروکیدگی نمونه‌ها نیز به‌صورت معنی‌داری کاهش یافت (p<۰/۰۵). زمان اعمال امواج مایکروویو تأثیر معنی‌داری بر آبگیری مجدد آلبالوهای خشک‌شده نداشت. مدل پیج به‌عنوان مدل مناسب برای پیش‌بینی کننده تغییرات نسبت رطوبت تحت شرایط مورد آزمایش انتخاب شد. در مجموع، اعمال ۱۲۰ثانیه مایکروویو پیش از فرآیند خشک‌کردن آلبالو به‌دلیل حفظ ترکیبات فنلی، افزایش سرعت انتقال جرم و کاهش زمان خشک‌کردن، توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: چروکیدگی، خشک کردن، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت، فنل کل

مقدمه

آلبالو (*Prunus cerasus* L.) میوه‌ای نسبتاً متنوع است و به‌طور گسترده در سراسر جهان پراکنده است و در آسیا، اروپا و آمریکای شمالی یافت می‌شود. آلبالو به‌دلیل طعم خاص و ترکیبات مفید برای سلامتی، یکی از محبوب‌ترین میوه‌ها است. آلبالو دارای ترکیبات منحصر به‌فردی همچون انواع آنتوسیانین و ترکیبات فنلی مختلف است. میوه تازه آلبالو را می‌توان علاوه بر تازه‌خوری برای تهیه کمپوت، آبمیوه، مربا و شربت استفاده کرد. همچنین این محصول به‌صورت منجمد و خشک نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد (Doymaz, 2007; Šumić *et al.*, 2013).

فرآیند خشک‌کردن می‌تواند یکی از مهمترین فرآیندها در تهیه مواد غذایی از محصولات کشاورزی باشد. خشک‌کردن حذف حداکثر آب از محصول مورد نظر با هدف افزایش مدت ماندگاری است (Momenzadeh *et al.*, 2010). به خشک شدن فرآورده‌های غذایی به‌صورت تک لایه تحت شرایط ثابت دمایی و رطوبتی خشک‌کردن به روش لایه‌نازک می‌گویند. در اکثر موارد خشک‌کردن باعث بهبود

۱، ۲ و ۳- به‌ترتیب دانشیار، دانشجوی کارشناسی ارشد و دانشجوی کارشناسی، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: F.Salehi@Basu.ac.ir)

https://doi.org/10.22067/ifstrj.2023.83605.1272

ویژگی ارگانولپتیکی محصول می‌گردد. محققان زیادی سینتیک خشک‌کردن محصولات کشاورزی را جهت یافتن بهترین مدل ریاضی برای توصیف سینتیک خشک شدن آن‌ها بررسی کرده‌اند (Delgado & da Silva, 2014; Ghaderi *et al.*, 2011). متداول‌ترین روش خشک‌کردن محصولات کشاورزی استفاده از جریان هوای داغ و به روش انتقال حرارت جابه‌جایی است که شامل انتقال جرم و حرارت هم‌زمان در محصول می‌باشد. خشک‌کردن با خشک‌کن هوای داغ علاوه بر داشتن مزایایی مانند امکان کنترل دقیق دما و شرایط فرآیند، دارای معایبی مانند زمان طولانی‌تر برای خشک‌کردن محصولات در مقایسه با سایر روش‌ها است (Amin Ekhlas *et al.*, 2023).

استفاده از پیش‌تیمارهای مختلف جهت کاهش زمان خشک‌کردن و بهبود خواص تغذیه‌ای، امروزه جایگاه ویژه‌ای در صنعت خشک‌کردن مواد غذایی دارد. همچنین استفاده از پیش‌تیمار سبب کاهش برخی از تغییرات ناخواسته مانند تغییر رنگ و بافت محصولات کشاورزی می‌شود (Sahin & Doymaz, 2017). امواج مایکروویو بخشی از طیف امواج الکترومغناطیس هستند و در طیف بین امواج دی‌الکتریک و فروسرخ قرار گرفته‌اند. این امواج به‌دلیل دارا بودن فرکانس کم، برخلاف اشعه ایکس و گاما، قادر به شکستن پیوندهای شیمیایی و آسیب‌رسانی به مولکول‌های مواد غذایی نیستند. مایکروویو از طریق ایجاد اصطکاک مولکولی به‌خصوص بین مولکول‌های آب، در غذا تولید حرارت می‌کند. حرارت تولید شده در سیستم مایکروویو به میزان آب موجود در مواد غذایی بستگی دارد و به عمق غذا نفوذ می‌کند (Salehi, 2020; Wray & Ramaswamy, 2015). نتایج گزارش‌های مربوط به مطالعات مختلف نشان می‌دهد که استفاده از پیش‌تیمار مایکروویو سبب کمترین آسیب به ترکیبات تغذیه‌ای موجود در گیاهان می‌شود (Akbarian Meymand *et al.*, 2015).

عین‌افشار (Einafshar, 2014) در پژوهشی خصوصیات فیزیکوشیمیایی، میکروبی و آنتی‌اکسیدانی چهار رقم آلبالو خشک‌شده به‌روش اسمزی را بررسی کرد. نتایج این پژوهش نشان داد که ارقام مختلف آلبالو از نظر خصوصیات رنگی، مقدار ترکیبات فنلی، آنتوسیانین‌ها و قدرت آنتی‌اکسیدانی با یکدیگر متفاوت هستند. همچنین انجام پیش‌تیمار اسمز بر خشک‌کردن آلبالو مؤثر بوده و کیفیت محصول خشک‌شده و خصوصیات آنتی‌اکسیدانی آن را افزایش می‌دهد. آلبالو خشک ماندگاری طولانی دارد و می‌تواند جایگزین خوبی برای میوه‌های تازه در تمام طول سال باشد (Wojdyło *et al.*, 2014). برای مثال دویماز (Doymaz, 2007) اثر پیش‌تیمار محلول اتیل اولئات قلیایی بر زمان خشک شدن آلبالو به‌صورت تجربی را بررسی کرد. در این پژوهش خشک‌کردن لایه‌نازک آلبالو در دو دمای هوای ۵۵ و ۶۵ درجه سلسیوس انجام شد. در پژوهش دیگری نیز وجدیلو و همکاران (Wojdyło *et al.*, 2014) اثر خشک‌کردن همرفتی و خلاء-مایکروویو بر سینتیک خشک شدن آلبالو را بررسی کردند. گروهی از پژوهشگران گزارش کردند که با افزایش توان مایکروویو و دمای هوای خشک‌کن، میزان چروکیدگی محصول خشک‌شده به‌دلیل سرعت بالای خروج رطوبت از محصول کاهش یافته و اندازه نمونه خشک‌شده بزرگتر می‌شود (Momenzadeh *et al.*, 2010).

در فرآیند خشک‌کردن توسط مایکروویو به علت تمرکز بهتر انرژی، رطوبت با سرعت بیشتری خارج شده و مدت زمان خشک شدن نیز کاهش می‌یابد (Maskan, 2000). در پژوهش حاضر سعی شد تا ضمن ارزیابی توانایی امواج مایکروویو در کاهش زمان خشک‌کردن آلبالو و حفظ ترکیبات فنلی، مناسب‌ترین مدل ریاضی برای توصیف سینتیک خشک شدن این میوه معرفی شود.

مواد و روش‌ها

درصد رطوبت اولیه آلبالو

این پژوهش در محدوده زمانی بهار تا تابستان ۱۴۰۲ در آزمایشگاه تخصصی دانشکده صنایع غذایی انجام شد. برای این پژوهش، آلبالو تازه از شهرستان بهار (استان همدان)، تهیه و تا زمان مصرف در یخچال نگهداری شد. برای تعیین رطوبت اولیه نمونه‌ها، از دستگاه آون (شیماز، ایران) با دمای ۱۰۳ درجه سلسیوس و در مدت زمان ۵ ساعت استفاده شد.

اعمال تیمار مایکروویو

با توجه به اینکه آلبالو تازه بیشتر به‌صورت سالم و همراه با هسته خشک و به بازار فروش عرضه می‌شود، در این پژوهش نیز برای اعمال تیمار مایکروویو و فرآیند خشک‌کردن از آلبالوهای سالم (هسته‌دار) استفاده شد. پیش‌تیمار مایکروویو توسط دستگاه مایکروویو (جی‌پلاس، مدل GMW-M425S.MIS00، شرکت گلدیران، ایران) بر آلبالوها اعمال گردید. برای این منظور، آلبالوها داخل دستگاه مایکروویو با توان ۲۲۰ وات به‌مدت ۰، ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ ثانیه قرار گرفتند.

فرآیند خشک‌کردن آلبالوهای تیمار شده

برای خشک‌کردن آلبالوهای تیمار شده از خشک‌کردن همرفتی (هوای داغ) استفاده شد. برای انجام عملیات خشک‌کردن با هوای داغ از آون فن‌دار با دمای ۷۰ درجه سلسیوس (شیماز، ایران) استفاده شد. در این روش تغییرات وزن نمونه‌ها در طی خشک شدن تا دستیابی به وزن ثابت، توسط ترازوی دیجیتالی (کیا، مدل SL1000، ایران) با دقت ۰/۰۱ ± گرم، ثبت شد.

محاسبه ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

برای تعیین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت[1] آلبالوهای تیمار شده هنگام خشک شدن توسط خشک‌کردن همرفتی، ابتدا مختصات نمونه کروی[2] در نظر گرفته شد و سپس از قانون دوم نفوذ فیک[3] استفاده شد. در این روش، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت از طریق شیب‌خط لگاریتم طبیعیِ نسبت رطوبت داده‌های تجربی در مقابل زمان خشک‌کردن و با استفاده از معادله ۱ محاسبه می‌شود (Amin Ekhlas *et al.*, 2023).

$$Slope = \frac{\pi^2 D_{eff}}{r^2} \qquad (۱)$$

در این معادله، r متوسط شعاع آلبالوها (m)، D_{eff} ضریب نفوذ مؤثر رطوبت (m^2s^{-1}) و Slope شیب‌خط می‌باشد.

مدل‌سازی سینتیکی

به‌منظور بررسی سینتیک و پیش‌بینی روند خشک شدن آلبالوهای تیمار شده، با کمک داده‌های تجربی و با استفادهاز مدل‌های ریاضی مختلف، مدل‌سازی سینتیکی انجام گردید. معادله‌های ونگ و سینگ، هندرسون و پابیس، تقریب انتشار، پیج، نیوتن، میدیلی و لگاریتمی برای مدل‌سازی فرآیند خشک‌کردن آلبالو و انتخاب بهترین مدل سینتیکی، انتخاب و بررسی شدند (Salehi & Satorabi, 2021b). به‌منظور مدل کردن داده‌های تجربی خشک‌کردن و به‌دست آوردن ثابت‌های مدل‌ها نیز از نرم‌افزار متلب ویرایش R2012a استفاده شد.

تعیین فنل کل

برای تهیه عصاره آلبالو، ۱۰ میلی‌لیتر متانول ۸۰ درصد به ۱ گرم پودر آلبالو خشک‌شده درون فالکون اضافه شد و به‌مدت ۲۴ ساعت روی شیکر قرار گرفت. سپس مخلوط به‌مدت ۵ دقیقه با سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه جهت حذف ترکیبات با قابلیت رسوب، سانتریفوژ[4] شد.

برای محاسبه فنل کل آلبالوهای خشک، ۰/۵ میلی‌لیتر از عصاره آلبالو (ماده رویی فالکون) در لوله آزمایش ریخته شد و ۰/۵ میلی‌لیتر معرف فنل فولین سیوکالتو[5] (سیگما–آلدریچ، آمریکا) به آن اضافه شد. پس از ۵ دقیقه، ۲ میلی‌لیتر کربنات سدیم (۲۰٪ وزنی در حجم) (مرک، آلمان) اضافه و به‌مدت ۳۰ ثانیه تکان داده شد. پس از انکوباسیون به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۲۵ درجه سلسیوس، ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر اضافه و رسوب تشکیل شده با استفاده از سانتریفوژ به‌مدت ۵ دقیقه در ۴۰۰۰ دور در دقیقه جدا شد. در نهایت، جذب مایع رویی در ۷۶۵ نانومتر با اسپکتروفتومتر (XD-7500، لاویباند، آلمان) ثبت و با منحنی استاندارد اسید گالیک مقایسه گردید. نتایج فنل کل با واحد میکروگرم اسید گالیک بر گرم ماده خشک گزارش شد (Vega-Gálvez *et al.*, 2009).

شاخص تغییرات رنگ

جهت بررسی تغییرات رنگ آلبالوهای خشک‌شده، از روش پردازش تصویر استفاده گردید. قبل و بعد از فرآیند خشک‌کردن، از نمونه‌ها توسط دوربین با کیفیت ۱۲ مگاپیکسل (iPhone 12 Pro, Apple Co., USA) عکس در فرمت JPG تهیه شد. بعد از تبدیل عکس‌ها به فرمت $L^*a^*b^*$ توسط نرم‌افزار Image J (version 1.42e, USA)، مؤلفه‌های رنگی آنها شامل مؤلفه‌های روشنایی ـ تیرگی (L^*)، سبزی ـ قرمزی (a^*)، آبی ـ زردی (b^*) به‌دست آمد و از آنها برای محاسبه شاخص تغییرات رنگ (ΔE) استفاده شد. مقادیر شاخص تغییرات رنگ (ΔE) در مقایسه با نمونه تازه با استفاده از معادله ۲ محاسبه شد (Salehi & Satorabi, 2021a).

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \qquad (۲)$$

چروکیدگی

درصد چروکیدگی یا تغییرات اندازه سطح (ΔA) آلبالوها که معیاری از کاهش سطح محصول در طی فرآیند خشک‌کردن می‌باشد، با استفاده از روش پردازش تصویر و رابطه ۳ محاسبه و گزارش شد. در این روش ابتدا از نمونه‌ها عکس با کیفیت بالا تهیه شد. سپس توسط نرم‌افزار Image J تعداد پیکسل‌های موجود در عکس به سانتی‌متر تبدیل گردید و با استفاده از بخش آنالیز نرم‌افزار، سطح نمونه‌ها برحسب سانتی‌متر مربع محاسبه و گزارش شد.

$$\Delta A = \frac{A_1 - A_2}{A_1} \times 100 \qquad (۳)$$

در این رابطه، A_1: سطح نمونه تازه (سانتی‌متر مربع) و A_2: سطح نمونه خشک‌شده (سانتی‌متر مربع) است (Salehi *et al.*, 2023).

آبگیری مجدد آلبالوهای خشک‌شده

برای محاسبه درصد آبگیری مجدد[6] (RR)، آلبالوهای خشک‌شده توزین، سپس درون حمام آب (مدل R.J42، شرکت پارس آزما، ایران) با دمای ۵۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند. نمونه‌ها بعد از گذشت ۳۰

1- Effective moisture diffusivity coefficient (Deff)
2- Spherical coordinate
3- Fick's second law of diffusion
4- Universal 320R, Hettich, Germany
5- Folin-Ciocalteu's phenol reagent
6- Rehydration ratio (RR)

دقیقه از آب خارج‌شده و توزین شدند. نسبت باز جذب آب توسط معادله ۴ محاسبه و گزارش شد (Salehi *et al.*, 2022).

$$RR = \frac{M}{M_0} \times 100 \qquad (۴)$$

در این معادله M وزن آلبالوها بعد از باز جذب آب و M_0 وزن آلبالوهای خشک می‌باشد.

آنالیز آماری

در این پژوهش اثر پیش‌تیمار مایکروویو در پنج سطح ۰، ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ ثانیه بر فنل کل، سینتیک افت رطوبت، زمان خشک شدن، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و آبگیری مجدد آلبالو بررسی شد. برای آنالیز آماری نتایج از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۱ استفاده شد. آزمون‌های خشک‌کردن در سه تکرار انجام و برای مقایسه میانگین پاسخ‌های مشاهده شده، از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۹۵٪ استفاده شد.

نتایج و بحث

اثر مایکروویو بر زمان خشک شدن

میانگین رطوبت اولیه آلبالوها برابر ۷۳/۸۰ درصد بر پایه مرطوب بود. در جدول ۱ اثر زمان اعمال مایکروویو بر زمان خشک شدن آلبالوها گزارش شده است. همان‌طور که در این جدول دیده می‌شود، با افزایش زمان اعمال مایکروویو، زمان خشک شدن نمونه‌ها به‌صورت معنی‌داری کاهش یافته است ($p<0/05$). با افزایش زمان تیمار مایکروویو از صفر به ۱۲۰ ثانیه، میانگین زمان خشک شدن آلبالوها در خشک‌کن هوای داغ به‌صورت معنی‌داری ۳۲/۴ درصد کاهش یافت ($p<0/05$). شارما و پراساد (Sharma & Prasad, 2006) برای خشک‌کردن سیر از مایکروویو آزمایشگاهی استفاده کرد. آنها تأیید کردند که خشک‌کردن حبه‌های سیر در مایکروویو باعث کاهش مدت زمان خشک شدن در مقایسه با خشک‌کردن با هوای گرم می‌شود و ویژگی‌های کیفی محصول خشک‌شده با روش مایکروویو نیز بالاتر است. دویماز (Doymaz, 2007) گزارش کرد که زمان خشک شدن آلبالو پیش‌تیمار شده با محلول اتیل اولئات قلیایی حدود ۲۶ تا ۳۰ درصد کوتاه‌تر از نمونه‌های تیمار نشده است.

شکل ۱ تغییر محتوای رطوبت آلبالوهای تیمار شده با مایکروویو طی فرآیند خشک شدن را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، تیماردهی آلبالو توسط امواج مایکروویو باعث تسریع در سرعت انتقال جرم و افزایش سرعت خروج رطوبت از نمونه‌ها شده است. قادری و همکاران (Ghaderi *et al.*, 2011) سینتیک خشک‌کردن میوه آلبالو در خشک‌کن مایکروویو-خلأ را بررسی کردند. براساس نتایج این پژوهش، توان ماکروویو و میزان خلأ روی سرعت خشک شدن آلبالو اثر مهمی دارند و با افزایش توان و کاهش فشار محفظه، زمان خشک شدن کاهش یافت.

اثر مایکروویو بر نفوذ مؤثر رطوبت

برای کاهش مشکلات ناشی از هدایت حرارتی پایین طی خشک‌کردن محصولات غذایی و دست یافتن به فرآیند تأثیرگذار، استفاده از مایکروویو برای این منظور افزایش یافته است. افزایش تمرکز حرارتی منجر به افزایش نفوذ رطوبت از محصول به محیط می‌شود (Kouchakzadeh & Shafeei, 2010; Mohammadpour Mir *et al.*, 2020; Pourhaji *et al.*, 2018). در جدول ۲ اثر زمان تیماردهی با مایکروویو بر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت آلبالو طی خشک شدن در خشک‌کن هوای داغ گزارش شده است. همان‌طور که در این جدول ملاحظه می‌شود با افزایش زمان اعمال مایکروویو، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت افزایش یافته است که منجر به تسریع خروج رطوبت از آلبالوها و در نتیجه کاهش زمان خشک شدن محصول شده است. با افزایش زمان تیمار مایکروویو از صفر به ۱۲۰ ثانیه، مشاهده گردید که ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برای آلبالوهای قرار گرفته در خشک‌کن همرفتی به‌صورت معنی‌داری از $3/16\times10^{-10}\,m^2/s$ به $5/83\times10^{-10}\,m^2/s$ افزایش یافت ($p<0/05$). دویماز (Doymaz, 2007) اثر پیش‌تیمار محلول اتیل اولئات قلیایی بر زمان خشک شدن آلبالو به‌صورت تجربی را بررسی کرد. این پژوهشگر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت آلبالو را در محدوده $4/75\times10^{-10}\,m^2/s$ تا $1/03\times10^{-9}\,m^2/s$ گزارش کرده است.

مدل‌سازی فرآیند خشک شدن آلبالو

با انتخاب یک مدل ریاضی مناسب که به کمک آن بتوان سینتیک خشک شدن یک محصول را پیش‌بینی کرد، می‌توان یک خشک‌کن جدید طراحی یا کارایی آن را ارزیابی نمود (Ghaderi *et al.*, 2011). با محاسبه مقدار نسبت رطوبت برای تمامی تیمارهای مورد مطالعه طی فرآیند خشک‌کردن آلبالوها و برازش نقاط حاصل از ترسیم نمودارهای نسبت رطوبت-زمان، به‌وسیله مدل‌های سینتیکی، نتایج برای هر مدل مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. بهترین مدل باید دارای بیشترین مقدار ضریب تبیین (r) و حداقل مقادیر خطا باشد.

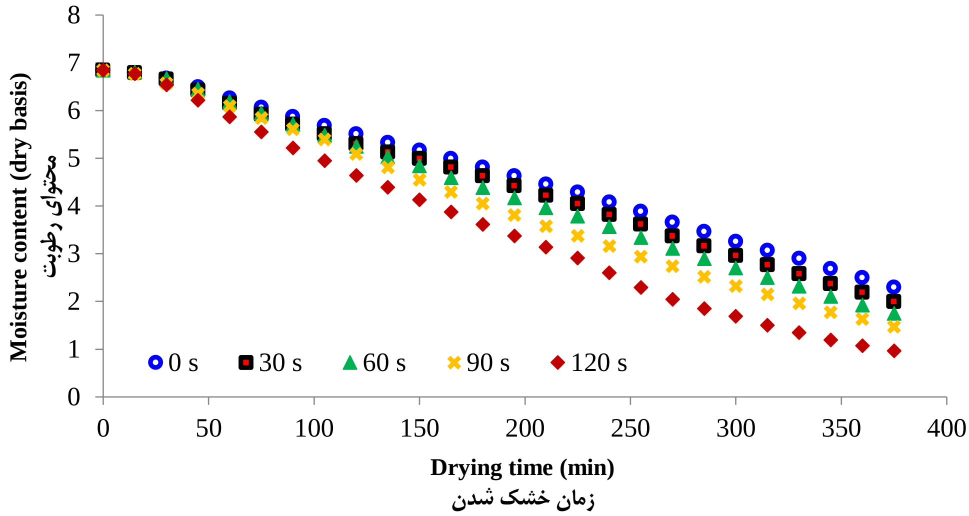
جدول ۱- تأثیر پیش‌تیمار مایکروویو بر زمان خشک‌کردن آلبالو

Table 1- Impact of microwave pretreatment on the drying time of sour cherry

Microwave time زمان مایکروویو	Drying time (min) زمان خشک‌کردن
0 s	370.0±7.07 [a]
30 s	345.0±12.25 [b]
60 s	320.0±7.07 [c]
90 s	300.0±12.25 [c]
120 s	250.0±7.07 [d]

حروف متفاوت بالای مقادیر نشان دهنده تفاوت معنادار است (p<۰/۰۵)

Different letters above the values indicate significant difference (p<0.05)



شکل ۱- تأثیر پیش‌تیمار مایکروویو بر محتوای رطوبت آلبالو طی فرآیند خشک شدن

Fig. 1. Impact of microwave pretreatment on the moisture content of sour cherry during drying process

جدول ۲- تأثیر پیش‌تیمار مایکروویوبر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت آلبالو

Table 2- Impact of microwave pretreatment on the effective moisture diffusivity coefficient of sour cherry

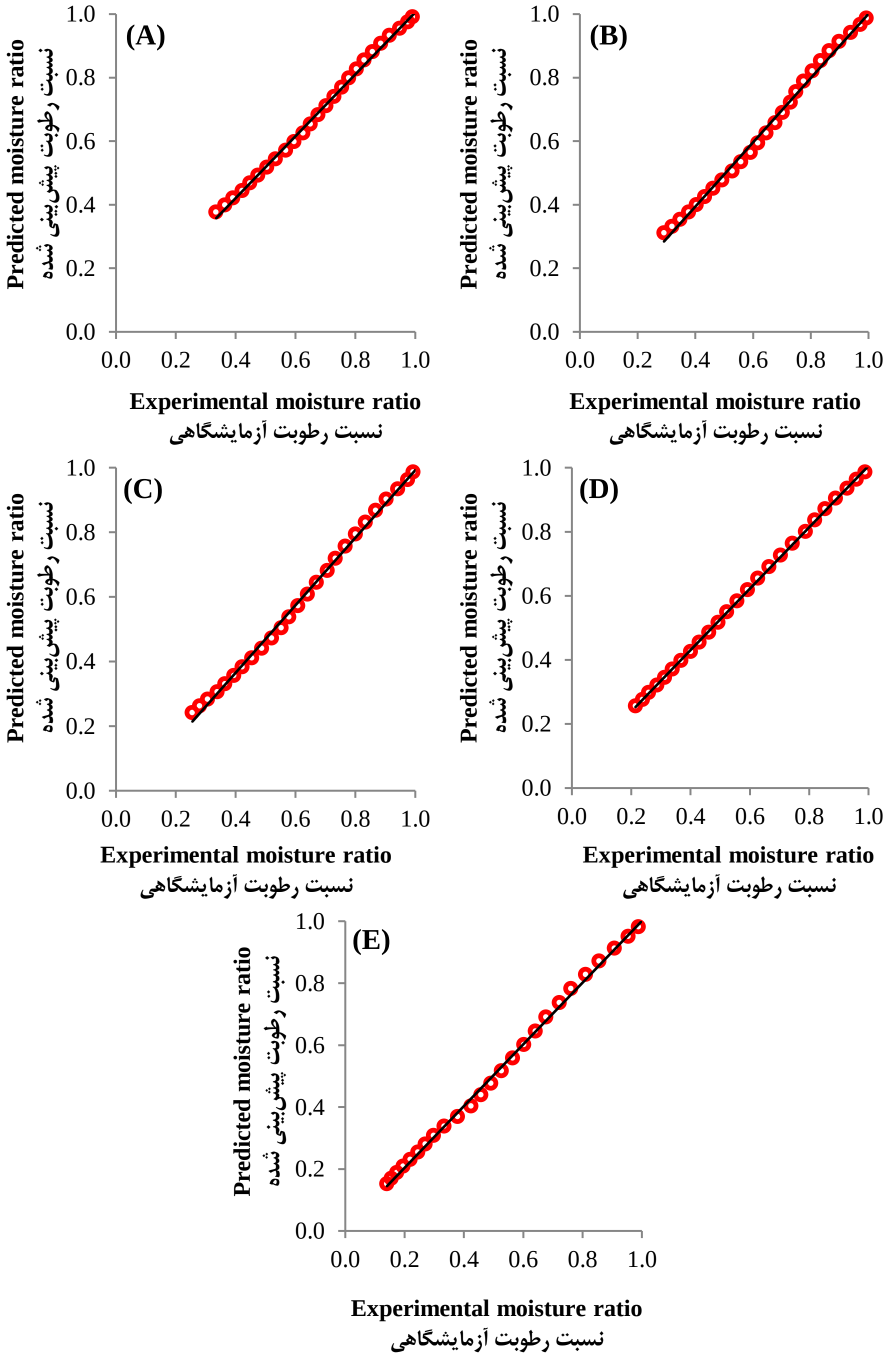
Microwave time زمان مایکروویو	moisture diffusivity coefficient (m^2/s) ضریب نفوذ مؤثر رطوبت
0 s	$3.16\times10^{-10}\pm1.12\times10^{-11}$ [d]
30 s	$3.59\times10^{-10}\pm1.86\times10^{-11}$ [d]
60 s	$4.08\times10^{-10}\pm1.79\times10^{-11}$ [c]
90 s	$4.56\times10^{-10}\pm2.85\times10^{-11}$ [b]
120 s	$5.83\times10^{-10}\pm1.89\times10^{-11}$ [a]

حروف متفاوت بالای مقادیر نشان دهنده تفاوت معنادار است (p<۰/۰۵)

Different letters above the values indicate significant difference (p<0.05)

در مجموع، نتایج نشان داد که بهترین مدل با بالاترین برازش، در مورد فرآیند خشک‌کردن آلبالوها، مدل پیج است. در جدول ۳ مجموع مربعات خطا، ضریب تبیین (r) و جذر میانگین مربعات خطا و همچنین ضرایب ثابت مدل پیج (n و k) برای شرایط مختلف خشک‌کردن آلبالوها گزارش شده است. در این پژوهش مقادیر مجموع مربعات خطا، ضریب تبیین و جذر میانگین مربعات خطا به‌ترتیب در محدوده ۰/۰۰۱ تا ۰/۰۰۷، ۰/۹۹۷ تا ۰/۹۹۹ و ۰/۰۰۵ تا ۰/۰۱۷ به‌دست آمد. در شکل ۲ نیز مقایسه داده‌های برازش شده توسط مدل پیج با نتایج تجربی نسبت رطوبت برای زمان‌های پیش‌تیمار مختلف گزارش شده است.

نمودارهای موجود در این شکل نیز نشان می‌دهد که مدل پیج انطباق خوبی با داده‌های نسبت رطوبت آزمایشگاهی دارد. لذا این مدل برای بررسی فرآیند خشک‌کردن آلبالوهای تیمار شده با مایکروویو توصیه می‌شود. قادری و همکاران (Ghaderi *et al.*, 2011) گزارش کردند که مدل میدلی به‌دلیل دارا بودن بالاترین ضریب همبستگی و کمترین خطا، مناسب‌ترین مدل برای بررسی فرآیند خشک‌شدن آلبالو در خشک‌کن مایکروویو-خلأ است.



شکل ۲- مقایسه داده‌های برازش شده توسط مدل پیج با نتایج تجربی نسبت رطوبت. A: ۰ثانیه، B: ۳۰ثانیه، C: ۶۰ثانیه، D: ۹۰ثانیه و E: ۱۲۰ثانیه

Fig. 2. Comparison of fitted data by Page model with experimental results of moisture ratio; A: 0 s, B: 30 s, C: 60 s, D: 90 s, and E: 120 s

فنل کل

آلبالو دارای آنتوسیانین‌های منحصر به فردی است و سرشار از ترکیبات فنلی است. در شکل ۳ اثر زمان اعمال مایکروویو بر فنل کل آلبالوهای خشک‌شده گزارش‌شده است. بر اساس نتایج گزارش شده در این شکل، اعمال بیش از ۶۰ ثانیه مایکروویو تأثیر معنی‌داری بر حفظ ترکیبات فنلی و افزایش مقدار این ترکیبات در آلبالوهای خشک‌شده داشته است ($p<0.05$). مقدار فنل کل نمونه تیمار شده با مایکروویو به مدت ۳۰ ثانیه نیز بیشتر از نمونه شاهد بود؛ اما از نظر آماری اختلاف

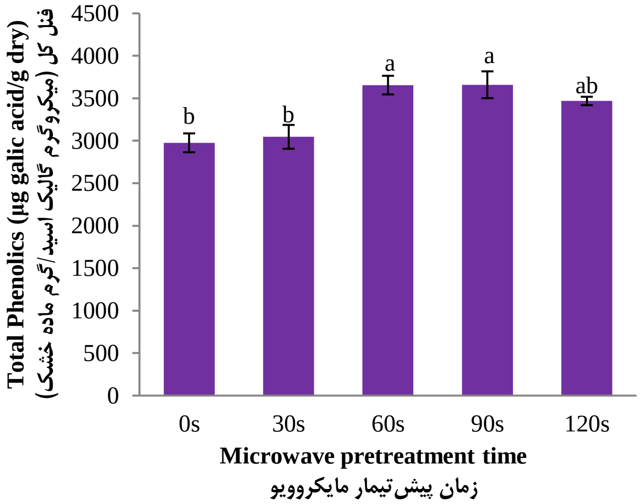
معناداری بین این نمونه و نمونه شاهد وجود نداشت (p>۰/۰۵). حداکثر مقدار فنل مربوط به نمونه تیمار شده با مایکروویو به مدت ۹۰ ثانیه بود. با افزایش زمان تیماردهی به ۱۲۰ ثانیه مقدار فنل کل کاهش یافت؛ البته این کاهش معنی‌دار نبود (p>۰/۰۵). هم‌راستا با نتایج این پژوهش، آزادبخت و همکاران (Azadbakht *et al.*, 2021) گزارش کردند که افزایش توان مایکروویو سبب افزایش مقدار فنل کل و ترکیبات فلاونوئیدی در هویج خشک‌شده می‌شود.

جدول ۳- ثابت‌ها و ضرایب مدل پیج برای پیش‌بینی پارامتر نسبت رطوبت

Table 3- The constants and coefficients of the Page model to predict the moisture ratio parameter

Microwave time زمان مایکروویو	k	n	SSE[1]	r	RMSE[2]
0 s	0.0003	1.4050	0.0026	0.9989	0.0102
30 s	0.0003	1.4123	0.0051	0.9980	0.0143
60 s	0.0003	1.4340	0.0029	0.9991	0.0108
90 s	0.0004	1.3983	0.0026	0.9992	0.0091
120 s	0.0003	1.4610	0.0029	0.9993	0.0109

1- Sum of squares due to error (SSE); 2- Root mean square error (RMSE)



شکل ۳- اثر پیش‌تیمار مایکروویو بر فنل کل آلبالو خشک

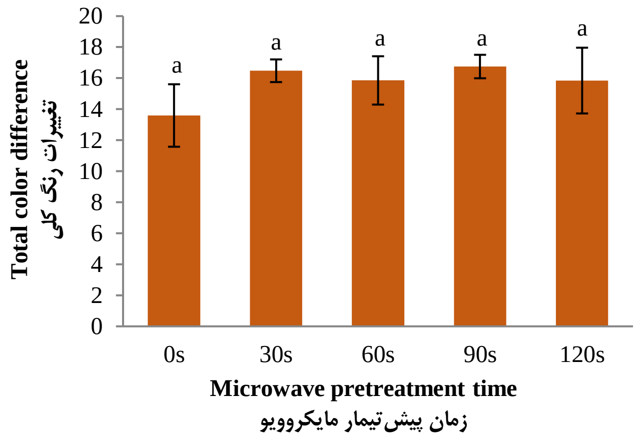
Fig. 3. Effect of microwave pretreatment on the total phenolics of dried sour cherry

حروف متفاوت بالای ستون‌ها نشان دهنده تفاوت معنادار است (p<۰/۰۵)

Different letters above the columns indicate a significant differences (p<0.05)

شاخص تغییرات رنگ

در این پژوهش متوسط مقدار عددی مؤلفه‌های روشنایی (L^*)، قرمزی (a^*) و زردی (b^*) آلبالوهای تازه به‌ترتیب برابر ۳۱/۲۰، ۱۶/۴۱ و ۰/۷۶ بود. فرآیند خشک شدن باعث کاهش مؤلفه‌های رنگی آلبالوها شد و متوسط مقدار عددی مؤلفه‌های روشنایی، قرمزی و زردی آلبالوهای خشک شده (تیمار نشده و تیمار شده) به‌ترتیب برابر ۲۲/۰۵، ۷/۱۹ و ۰/۳۹ بود. برای بررسی دقیق‌تر تغییرات رنگ آلبالوها بعد از فرآیند خشک کردن، شاخص تغییرات رنگ کلی برای همه تیمارهای مایکروویو با استفاده از میانگین عددی مؤلفه‌های رنگی محاسبه در شکل ۴ گزارش شد. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، اعمال تیمار مایکروویو باعث افزایش مقدار عددی شاخص تغییرات رنگ آلبالوهای خشک‌شده شد، اما تأثیر معنی‌داری بر تغییر آنها نداشت (p>۰/۰۵). این شکل نشان می‌دهد که تیمار مایکروویو علاوه بر تأثیرات مثبتی که در کاهش زمان خشک شدن و حفظ ترکیبات فنلی دارد، تأثیر منفی هم بر رنگ سطحی نمونه‌ها نمی‌گذارد.



شکل ٤- اثر پیش‌تیمار مایکروویو بر شاخص تغییرات رنگ کلی آلبالو خشک

Fig. 4. Effect of microwave pretreatment on the total color difference index of dried sour cherry

حروف متفاوت بالای ستون‌ها نشان دهنده تفاوت معنادار است (p<۰/۰۵)

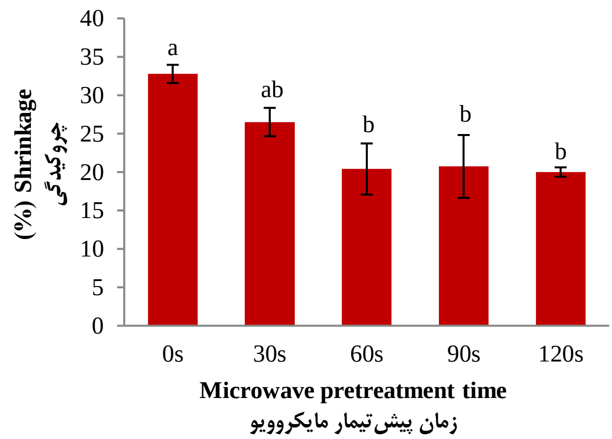
Different letters above the columns indicate a significant differences (p<0.05)

چروکیدگی

در شکل ۵ اثر زمان اعمال مایکروویو بر چروکیدگی آلبالوهای خشک‌شده گزارش‌شده است. با اعمال بیش از ۶۰ ثانیه مایکروویو، به علت افزایش سرعت خروج رطوبت از نمونه و کاهش زمان خشک شدن، چروکیدگی نمونه‌ها نیز به‌صورت معنی‌داری کاهش یافت (p<۰/۰۵). مقدار چروکیدگی نمونه تیمار شده با مایکروویو به‌مدت ۳۰ ثانیه نیز کمتر از نمونه شاهد بود؛ اما از نظر آماری اختلاف معناداری بین این نمونه و نمونه شاهد وجود نداشت (p>۰/۰۵).

آبگیری مجدد

آلبالو را می‌توان به‌صورت تازه، خشک یا فرآوری شده در بسیاری از محصولات استفاده کرد. در جدول ۴ اثر زمان اعمال مایکروویو بر آبگیری مجدد آلبالوهای خشک‌شده گزارش‌شده است. براساس نتایج گزارش شده در این جدول، اعمال مایکروویو تأثیر معنی‌داری بر تغییر درصد آبگیری مجدد آلبالوهای خشک‌شده نداشت (p>۰/۰۵). در این پژوهش، متوسط آبگیری مجدد آلبالوهای خشک‌شده ۱۱۱/۶۵ درصد بود.



شکل ٥- اثر پیش‌تیمار مایکروویو بر چروکیدگی آلبالو خشک

Fig. 5. Effect of microwave pretreatment on the shrinkage of dried sour cherry

حروف متفاوت بالای ستون‌ها نشان دهنده تفاوت معنادار است (p<۰/۰۵)

Different letters above the columns indicate a significant differences (p<0.05)

جدول ٤- تأثیر پیش‌تیمار مایکروویوبر آبگیری مجدد آلبالو خشک‌شده
Table 4- Impact of microwave pretreatment on the rehydration ratio of dried sour cherry

Microwave time زمان مایکروویو	Rehydration ratio(%) آبگیری مجدد
0 s	112.87±3.69 [a]
30 s	110.79±2.23 [a]
60 s	109.70±2.68 [a]
90 s	112.62±2.95 [a]
120 s	112.25±3.48 [a]

حروف متفاوت بالای مقادیر نشان دهنده تفاوت معنادار است (p<۰/۰۵)
Different letters above the values indicate significant difference ($p<0.05$)

نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر پیش‌تیمار مایکروویو بر سرعت انتقال جرم طی فرآیند خشک‌کردن آلبالو در خشک‌کن همرفتی بررسی شد. زمان تیماردهی با مایکروویو تأثیر معنی‌داری در کاهش زمان خشک شدن آلبالوها در خشک‌کن هوای داغ داشت (p<۰/۰۵). برای تعیین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت آلبالوهای تیمار شده هنگام خشک شدن، ابتدا مختصات نمونه کروی در نظر گرفته شد و سپس از قانون دوم نفوذ فیک استفاده شد. با افزایش زمان تیمار مایکروویو تا ۱۲۰ ثانیه، مقدار ضریب نفوذ مؤثر رطوبت ۸۵ درصد افزایش یافت که منجر به ۳۲ درصد کاهش در زمان خشک‌شدن آلبالوها شد. جهت بررسی سینتیک خشک شدن آلبالوهای تیمار شده، مدل‌های ریاضی بر داده‌های آزمایشگاهی برازش و در مجموع مدل پیج براساس بالاترین صحت به‌عنوان بهترین مدل انتخاب شد. به‌طور کلی، بهترین شرایط برای خشک‌کردن آلبالو، ۱۲۰ ثانیه پیش‌تیمار با مایکروویو بود. با افزایش زمان تیماردهی به ۱۲۰ ثانیه مقدار فنل کل کاهش یافت؛ البته این کاهش معنی‌دار نبود (p>۰/۰۵). نتایج این پژوهش نشان داد که تیمار مایکروویو علاوه بر تأثیرات مثبتی که در کاهش زمان خشک شدن و حفظ ترکیبات فنلی دارد، تأثیر منفی بر رنگ سطحی و درصد آبگیری مجدد آلبالوهای خشک‌شده نمی‌گذارد. مقدار چروکیدگی نمونه تیمار شده با مایکروویو به مدت ۳۰ ثانیه نیز کمتر از نمونه شاهد بود؛ اما از نظر آماری اختلاف معناداری بین این نمونه و نمونه شاهد وجود نداشت (p>۰/۰۵).

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از معاونت محترم پژوهش و فناوری دانشگاه بوعلی سینا به‌دلیل حمایت‌های مادی و معنوی از این پژوهش، صمیمانه تشکر و قدردانی نمایند.

References

1. Akbarian Meymand, M.J., Faraji Kafshgari, S., Mahmodi, E., & Vatankhah, M. (2015). The effect of using microwave pretreatment in drying roots nutmeg on antimicrobial properties against pathogenic bacteria and spoilage molds. *Iranian Journal of Medical Microbiology*, *9*(2), 47-55.
2. Amin Ekhlas, S., Pajohi-Alamoti, M.R., & Salehi, F. (2023). Effect of ultrasonic waves and drying method on the moisture loss kinetics and rehydration of sprouted wheat. *Journal of Food Science and Technology (Iran)*, *20*(135), 159-168. https://doi.org/10.22034/fsct.19.135.159
3. Azadbakht, M., Vahedi Torshizi, M., Mahmoodi, M.J., & Ghazagh Jahed, R. (2021). Mathematical modeling of the biochemical properties of carrots by microwave drying with different pretreatments using response surface methodology. *Food Engineering Research*, *21*(72), 35-56. https://doi.org/10.22092/fooder.2020.343389.1273
4. Delgado, J.M.P.Q., & da Silva, M.V. (2014). Food Dehydration: Fundamentals, Modelling and Applications, in: Delgado, J.M.P.Q., Barbosa de Lima, A.G. (Eds.), *Transport phenomena and drying of solids and particulate materials*. Springer International Publishing, Cham, pp. 69-94.
5. Doymaz, İ. (2007). Influence of pretreatment solution on the drying of sour cherry. *Journal of Food Engineering*, *78*(2), 591-596. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.10.037
6. Einafshar, S. (2014). Quality and microbial changes of four dried sour cherry by osmosis process through one year storage. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, *10*(4), 363-374. https://doi.org/10.22067/ifstrj.v10i4.43732.
7. Ghaderi, A., Abbasi, S., Motevali, A., & Minaei, S. (2011). Selection of a mathematical model for drying kinetics of sour cherry (*Prunus cerasus* L.) in a microwave-vacuum dryer. *Iranian Journal of Nutrition Sciences and Food Technology*, *6*(2), 55-64.
8. Kouchakzadeh, A., & Shafeei, S. (2010). Modeling of microwave-convective drying of pistachios. *Energy Conversion and Management*, *51*(10), 2012-2015. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.02.034

9. Maskan, M. (2000). Microwave/air and microwave finish drying of banana. *Journal of Food Engineering*, *44*(2), 71-78. https://doi.org/10.1016/S0260-8774(99)00167-3
10. Mohammadpour Mir, M.E., Nanvakenari, S., & Movagharnejad, K. (2020). Modeling and investigation of the performance of MLP and RBF during the paddy rice drying in microwave dryer. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, *16*(2), 331-341. https://doi.org/10.22067/ifstrj.v16i2.80737
11. Momenzadeh, L., Zomorodian, A.A., & Mowla, D. (2010). Applying artificial neural network for shrinkage prediction of green pea in a microwave assisted fluidized bed dryer. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, *6*(4), 277-285. https://doi.org/10.22067/ifstrj.v6i4.9285
12. Pourhaji, F., Tabatabaei Yazdi, F., Mortazavi, S.A., Mohebbi, M., & Mazaheri Tehrani, M. (2018). Foam mat drying of banana milk using microwave and evaluation of resulting powders's properties. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, *14*(2), 283-296. https://doi.org/10.22067/ifstrj.v0i0.60551
13. Sahin, M., & Doymaz, İ. (2017). Estimation of cauliflower mass transfer parameters during convective drying. *Heat and Mass Transfer*, *53*(2), 507-517. https://doi.org/10.1007/s00231-016-1835-0
14. Salehi, F. (2020). *Food industry machines and equipment*. Bu-Ali Sina University Press, Hamedan, Iran.
15. Salehi, F., Cheraghi, R., & Rasouli, M. (2022). Mass transfer kinetics (soluble solids gain and water loss) of ultrasound-assisted osmotic dehydration of apple slices. *Scientific Reports*, *12*(1), 15392. https://doi.org/10.1038/s41598-022-19826-w
16. Salehi, F., Razavi Kamran, H., & Goharpour, K. (2023). Effects of ultrasound time, xanthan gum, and sucrose levels on the osmosis dehydration and appearance characteristics of grapefruit slices: process optimization using response surface methodology. *Ultrasonics Sonochemistry*, *98*, 106505. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106505
17. Salehi, F., & Satorabi, M. (2021a). Effect of basil seed and xanthan gums coating on colour and surface change kinetics of peach slices during infrared drying. *Acta Technologica Agriculturae*, *24*(3), 150-156. https://doi.org/10.2478/ata-2021-0025
18. Salehi, F., & Satorabi, M. (2021b). Influence of infrared drying on drying kinetics of apple slices coated with basil seed and xanthan gums. *International Journal of Fruit Science*, *21*(1), 519-527. https://doi.org/10.1080/15538362.2021.1908202
19. Sharma, G.P., & Prasad, S. (2006). Optimization of process parameters for microwave drying of garlic cloves. *Journal of Food Engineering*, *75*(4), 441-446. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.04.029
20. Šumić, Z., Tepić, A., Vidović, S., Jokić, S., & Malbaša, R. (2013). Optimization of frozen sour cherries vacuum drying process. *Food Chemistry*, *136*(1), 55-63. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.07.102
21. Vega-Gálvez, A., Di Scala, K., Rodríguez, K., Lemus-Mondaca, R., Miranda, M., López, J., & Perez-Won, M. (2009). Effect of air-drying temperature on physico-chemical properties, antioxidant capacity, colour and total phenolic content of red pepper (*Capsicum annuum*, L. var. Hungarian). *Food Chemistry*, *117*(4), 647-653. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.04.066
22. Wojdyło, A., Figiel, A., Lech, K., Nowicka, P., & Oszmiański, J. (2014). Effect of convective and vacuum–microwave drying on the bioactive compounds, color, and antioxidant capacity of sour cherries. *Food and Bioprocess Technology*, *7*(3), 829-841. https://doi.org/10.1007/s11947-013-1130-8
23. Wray, D., & Ramaswamy, H.S. (2015). Novel concepts in microwave drying of foods. *Drying Technology*, *33*(7), 769-783. https://doi.org/10.1080/07373937.2014.985793